

电力系统暂态电压波形压缩记录技术

刘有为, 李忠晶, 鞠登峰, 王云

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

Compressed Recording Technique for Power System Transient Voltage Waveform

LIU You-wei, LI Zhong-jing, JU Deng-feng, WANG Yun

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: A compressing storage technique for wave recording, which can process high-speed sampling data in real-time mode and compress the point-similar data, is proposed. The lower the equivalent frequency of wave segment, the better the effect of data compression. By means of measured data, the effects of data compression and waveform recurrence are demonstrated successfully and it is proved that using the proposed compressing storage technique, the utilization rate of memory capacity in recording equipment can be raised up to thousand times, thus the proposed technique make it possible to record transient voltage waveform with very high frequency components and long time duration. The proposed technique is especially suitable to the condition that the equivalent frequency of the waveform severely varies with time and data processing burden in late stage is lightened considerably, besides, the display effect of measuring instrument is improved obviously.

KEY WORDS: power system; transient voltage; compressing storage; point-similarity

摘要: 提出一种电压波形压缩记录技术。该技术基于“点相似”的数据处理方法, 实时处理高速采样所得数据, 对点相似的数据进行压缩, 波形片段的等值频率越低, 数据压缩效果越好。文章通过实测数据说明了压缩效果和波形复现效果, 证明在应用该压缩存储技术后, 记录设备存储容量的利用率提高了上千倍, 这使得记录持续时间长并带有很高频率分量的暂态电压波形成为可能。该技术特别适用于波形等值频率随时间变化较大的情况, 压缩存储技术也大幅度减轻了后期数据的处理量, 并明显改善测量仪器的显示效果。

关键词: 电力系统; 暂态电压; 压缩存储; 点相似

0 引言

电力系统在操作、故障及雷击等情况下, 都会产生暂态过电压^[1-3]。尽管抑制暂态过电压的措施已较为完备^[4-5], 但暂态过电压依然是危及输变电设备绝缘的重要因素^[6-8]。实践证明, 只要准确掌握了暂

态电压的产生机制和规律, 通常可以找到符合工程要求的解决方案。就事故原因来看, 有的是过高的暂态电压所致, 有的则是设备自身的质量缺陷。原因不同, 采取的控制措施也不同。但在没有完整暂态过程记录的情况下难以对事故原因做出准确认定, 这类事故的处置往往成为较为棘手的问题。相反, 如果完整记录了暂态过程, 事故原因的分析就会简单很多, 也能排除因一些不合实际的推测而产生的误判, 这对于制定有效的反事故措施、保障设备安全运行是十分必要的。

目前的 110 kV 以上系统虽配有故障录波装置^[9-11], 但记录的是稳态和等值频率不高的暂态过程, 不能满足雷电及等值频率较高的操作冲击的记录需求, 对于这些快速暂态过电压直接或间接引起的事故, 传统录波装置对事故原因分析上的帮助有限。近年来, 系统中也安装了一些快速暂态电压记录装置, 但大都只能记录 1 个单次过程^[12-15]。一个事故过程可能是多个暂态过程的集合, 如多重雷击、间歇性弧光接地过电压等等^[8], 这种情况下把暂态连同多次暂态之间的稳态过程都完整记录下来, 更有利于分析事故原因。此时, 完整记录整个事故过程面临两难的选择: 选择高的采样速率, 则常常受到存储空间限制, 难以保证暂态过程被完整记录; 选择低的采样速率, 则无法记录雷电冲击波形及等值频率较高的操作冲击波形。暂态电压压缩记录技术正是在这一背景下产生的, 这一技术很好地解决了高速采样和长时间记录之间的矛盾, 并获得了国家发明专利^[8,16]。本文将对此项技术进行介绍, 阐述其实现方法并通过应用实例验证该技术的有效性。

1 暂态电压压缩记录的基本思路

较常见的暂态过电压是稳态波形上叠加 1 个或

多个暂态过程,雷电冲击、操作冲击及输变电设备绝缘单次或重复闪络引起的过电压,都属于此类。图1是一个典型的操作过电压波形。可以看到,整个波形包括变化缓慢的稳态部分和等值频率较高的暂态部分。记录操作过电压需要较高的采样速率,但操作过电压只占很短时间,对于占绝大部分时间的稳态电压,传统的高速采样和存储方式不仅浪费了宝贵的存储空间,也无谓地增加了后期数据处理工作量。对于慢速变化的稳态部分,高速采样的许多点可略去不计,仅对变化速率快的暂态部分才把高速采样的全部数据记录下来,这样就满足了既节省存储空间、又可准确记录波形的双重要求。

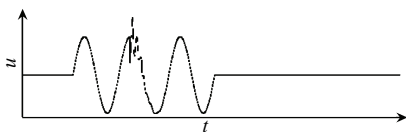


图1 信号发生器产生的操作过电压示例波形
Fig. 1 Sample of switching overvoltage produced by a signal generator

谐振过电压也是比较常见的暂态过电压,图2为一段典型的谐振过电压波形。这段波形共有7个周期,这7个周期在波形和幅值上都相似,在工程上可以认为是相同的,如果只记录第一个波形,并记录之后相同波形的重复次数,直至遇到不相同波形为止,就会显著减少存储空间和后期数据处理工作量。对于图2所示波形,这样处理大致可以节省85%的存储空间。在工程实践中,这种波形类似、持续时间相对较长的暂态过电压是常见的,除谐振过电压外,还有工频过电压,都适合采用波形压缩的记录方式。

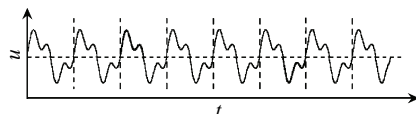


图2 谐振过电压波形片段
Fig. 2 A segment of resonance overvoltage

2 点压缩存储及实现方法

前面分析了波形压缩存储的思路,但在实际中,采样及记录在并行操作,此时,记录系统并不能识别波形等值频率的高低。为了实现波形数据的压缩存储,提出一个“相似点”的概念,所谓相似点,就是幅值上十分近似,在工程上可以认为相等的点。所有相似的点,在存储时只保留1个,其它均被略去,以达到压缩存储的目的。这里,两个点相似的条件可以表示为

$$|U_0 - U_2| \leq U_m x \quad (1)$$

$$|U_0 - U_2| \leq U_0 y \quad (2)$$

式中: U_0 为基准点的幅值; U_2 为比较点的幅值; U_m 为被测稳态电压的峰值; x 和 y 为误差控制因子,其大小决定着压缩存储的策略, x 和 y 越大,压缩率越高,但波形的失真度也越大。式(1)所表达的压缩策略相当于等幅差存储,即各相邻存储点的幅值差是相等的,一个幅差之内的其它采样点全被忽略,这一压缩策略适宜于工程许可的绝对误差已知情况。式(2)所表达的压缩策略不需要知道稳态电压的幅值,压缩率也稍低,但波形失真度也小,是本文首推的波形压缩存储技术。下面以式(2)所表达的压缩策略为例,说明具体的压缩存储方法。

为叙述方便,把采样值序列用下标表示,如 U_1, U_2, U_3, \dots ,对应的时间为 t_1, t_2, t_3, \dots ;由于是压缩存储,并不是所有采样值都被存储,因而采样序列不等同于存储系列,这里把存储的采样值序列用上标表示,如 U^1, U^2, U^3, \dots ,对应的时间为 t^1, t^2, t^3, \dots 。假设一个暂态电压记录系统,给定误差控制因子 y 为1%,系统以较高的采样速率(如20MHz)进行数据采集,采样到第一个有效点之后即存储之,记为 U^1 , U^1 的幅值 U_1 赋予 U_0 ,作为首个基准点,对 U^1 之后的采样点不断按式(3)进行检验,即

$$|U_0 - U_i| \leq U_0 \times 1\%, i = 2, 3, 4, \dots \quad (3)$$

假设第 j 点不满足式(3),则称第 j 点与基准点不相似,令系统存储该点的幅值 U_j 和时间 t_j ,记为 U^2 。然后,把 U^2 的幅值 U_j 赋予 U_0 ,对 U^2 之后的采样点不断按式(3)进行检验,直到第 $k(k \geq j+1)$ 个采样点不满足式(4)为止。

$$|U_0 - U_i| \leq U_0 \times 1\%, i = j+1, j+2, j+3, \dots \quad (4)$$

然后,存储该采样点的幅值 U_k 和时间 t_k ,记为 U^3 。如此反复,形成存储系列 $U^1, U^2, U^3, \dots, U^m$, m 值决定于实际存储采样点的多少。

前述 t_k 可表示为

$$t_k = \Delta t \times (k-1), k = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

式中: k 为自 U^1 算起的采样点数; Δt 为相邻采样点之间的时间间隔,由采样速率决定。

式(2)所示的点压缩存储方式不仅适宜于电力系统暂态电压的记录,对于其它等值频率随时间有较大变化的任意波形都适用,且有很好的压缩效果。如图3所示,点压缩存储的本质就是高速采样、变速存储,既能准确记录快速变化的波形片段,又能在波形相对缓慢变化时大量节约存储空间,显著减少后期数据处理任务。

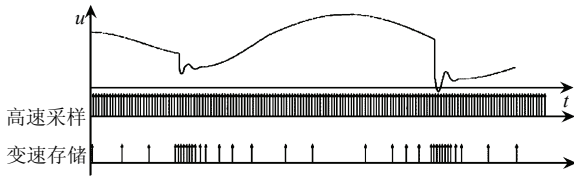


图3 点压缩存储示意

Fig. 3 A sketch map of point compressing record technique

3 片断压缩存储及实现方法

前面已经提到,对于简单重复的暂态电压,鉴于各周期波形基本相同,持续时间较长,可进一步将简单重复的波形片段全部略去,只记录略去的时间长度,以便波形复现。与点压缩存储类似,只有与当前已记录波形相邻且波形相似的片段才能被略去。判断波形相似与否的判据可以是同一周期选择多点、各对应点均方差和的大小,或仅仅是峰值的大小。下面以峰值大小作为波形相似判据,说明片段压缩存储的实现方法。

峰值通过峰值保持电路检测,并有2个周期(推荐)的数据缓存空间,如图4所示,首先检测第一个

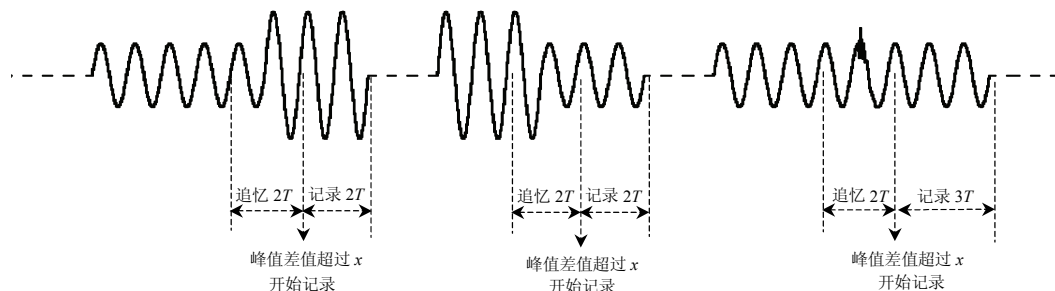


图4 片段压缩存储示意

Fig. 4 A sketch map of segment compressing record

4 综合压缩存储

点压缩存储已有很好的压缩效果,但对于间歇性弧光接地过电压、谐振过电压等情形,单独应用点压缩存储仍然不能满足要求,在此情况下,点压缩存储结合片段压缩存储,可以取得很好的实用效果。

5 应用实例及分析

在暂态电压记录仪中,成功应用了点压缩和片断压缩存储技术^[16-17]。下面对暂态电压记录仪记录的几种波形应用上述压缩存储方法前、后的效果进行对比分析。

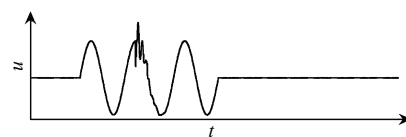
对图1所示的原始波形,采用1.25 MHz的采样率,记录波形见图5(a),在不压缩的情况下,存储量为390 k字节;如果使用式(2)的点压缩存储方法,误差控制因子设为1%,记录波形见图5(b),存储量仅为3 k字节,节省了99%的存储空间。可

有效峰值 U_{m0} ,并存储峰值前后各2个周期的波形。之后不断检测后继波形的峰值 U_m ,并按式(6)进行检验,如果满足式(6)所列条件,则不存储,直到在某一时刻 t_1 ,检测到的新峰值不再满足式(6),此时存储 t_1 前后各2个周期的波形,并记录 t_1 值,其中 t_1 前的波形数据通过缓存提取。同时,将 t_1 时刻的峰值作为新的比较基准,即令 $U_{m0}=U_m$,之后再重复前述过程,直到记录结束。

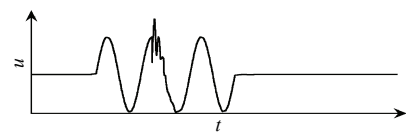
$$\left| \frac{U_{m0} - U_m}{U_{m0}} \right| \leq x \quad (6)$$

式中 x 为偏差控制因子, x 越大,压缩率也越大,但遗失实际存在差异波形片段的几率也相应增大,一般 x 取5%~30%。

尽管单纯峰值判断不能严格保证周期信号的相似,但通常情况下,完整捕捉系统电压峰值的变化过程及其邻近2个周期的信号基本可以满足分析事故成因的要求。因此,与点压缩存储方式不同,片段压缩有更严格的适用范围。



(a) 正常记录的波形



(b) 压缩后记录的波形

图5 使用点压缩算法前后记录的过电压波形

Fig. 5 Comparison of recorded wave before and after using point compressing record technique

以看出,压缩前后波形相同,未出现明显的失真。

为了记录雷电波等高频率的波形,需要使用更高的采样率。暂态电压记录仪的最高采样率应达到20 MHz。图6和图7为使用点压缩前后用20 MHz的采样率记录的工频叠加雷电冲击的波形及冲击部分的放大图。压缩前的存储量为3200 k字节,压

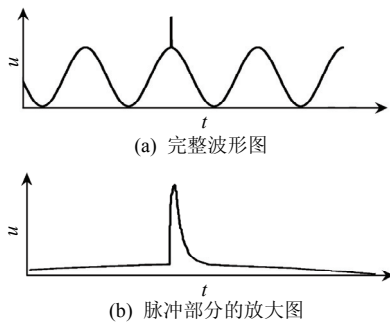


图 6 正常记录的工频叠加雷电冲击波形

Fig. 6 An impulse superimposed on power wave using normal record technique

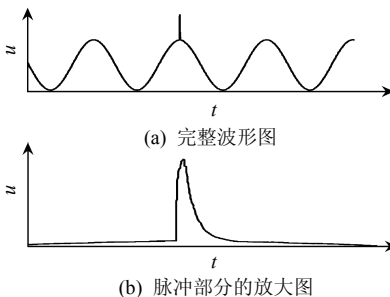


图 7 使用点压缩法记录的工频叠加雷电冲击波形

Fig. 7 An impulse superimposed on power wave using point compressing record technique

缩后的存储量为 3.16 k 字节,节省了 99.9%的存储空间。对比冲击部分的放大图可以看出,虽然使用了点压缩存储法,但对高频脉冲的记录仍然能够做到不失真,而数据量仅为不压缩时的 0.1%,这也使数据处理工作、仪器的响应速度得到显著改善。

在记录持续时间较长的稳态波形时,使用了片断压缩存储方法。图 8 为电压突然降低、经过一段时间又恢复的波形,中间持续时间为 2 min,暂态电压记录仪仅记录了 2 个波形片断,选择偏差控制因子 $x=30\%$ 。如果不采用片断压缩存储法,则至少需要记录 2 min 的波形,即使使用 1.25 MHz 的采样率,也需 286M 字节的存储空间。而采用了片断压缩存储法后,两个片断的时间长度均为 80 ms,存储量为 390 k 字节,综合使用点压缩存储法,存储量仅为 4.07 k 字节,极大地节省了存储空间。

从以上的对比分析可以得出结论,综合使用点

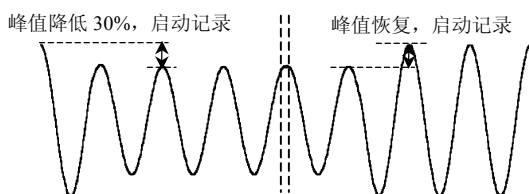


图 8 电压降低故障及电压恢复时记录的波形片断

Fig. 8 A recording sample for an event of system voltage drop and recovery

压缩和片断压缩存储方法,既能准确捕捉快速变化的暂态波形,又能完整记录持续时间较长的稳态波形,对于记录电力系统暂态电压具有十分重要的意义。基于上述波形压缩技术的暂态电压记录仪在 1 000 kV 晋东南—南阳—荆门特高压交流试验示范工程的调试中已经发挥了重要的作用。

6 结论

1) 波形压缩存储技术在电力系统调试、事故过程记录和反演中有着现实的需求。其中点压缩存储技术有着更加广泛的应用。

2) 点压缩存储效果显著,对于文中示例波形,压缩率可高达 99.9%,波形复现良好,极大地扩展了仪器的记录长度,也节约了后期的数据处理时间。

3) 本文提出的波形压缩存储技术经过现场检验,效果良好。

参考文献

- [1] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985: 142-145, 253, 295.
- [2] 方瑜. 配电网过电压[M]. 北京: 中国电力出版社, 1993: 2-3.
- [3] 张伟钺, 高玉明. 电力系统过电压与绝缘配合[M]. 北京: 清华大学出版社, 1988: 85, 216-217.
- [4] DL/T 620, 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 1997.
- [5] 陈维江, 孙昭英, 李国富, 等. 110kV 和 220kV 架空线路并联间隙防雷保护研究[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 70-75. Chen Weijiang, Sun Zhaoying, Li Guofu, et al. Development of parallel gap lightning protection device for 110 kV and 220 kV overhead lines[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 70-75(in Chinese).
- [6] 舒印彪, 刘泽洪, 袁骏, 等. 2005 年国家电网公司特高压输电论证工作综述[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 1-12. Shu Yinbiao, Liu Zehong, Yuan Jun, et al. A survey on demonstration of UHV power transmission by State Grid Corporation of China in the year of 2005[J]. Power System Technology, 2006, 30(5): 1-12(in Chinese).
- [7] 林集明, 王晓刚, 班连庚, 等. 特高压空载变压器的合闸谐振过电压[J]. 电网技术, 2007, 31(2): 5-10. Lin Jiming, Wang Xiaogang, Ban Liangeng, et al. Resonance overvoltage caused by energizing no-load transformers in 1000kV AC transmission system[J]. Power System Technology, 2007, 31(2): 5-10(in Chinese).
- [8] 王云. 暂态电压实时压缩记录技术及仪器的研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [9] DF1024 便携式波形记录仪 产品手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2000.
- [10] ZH-2 电力故障录波分析装置 产品手册[Z]. 武汉: 武汉中元华电科技股份有限公司, 2006.
- [11] 李媛, 刘涤尘, 杜新伟, 等. 电力故障波形再现及分析系统的开发[J]. 电网技术, 2006, 30(5): 106-110.

(下转第 98 页 continued on page 98)